

ESCOLA POLITÉCNICA - USP

Planejamento de Lavra de Longo Prazo em Mina de Calcário Industrial

Leonardo Mendes Barlach

Dissertação apresentada ao Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
EPUSP como Trabalho de Formatura

São Paulo

2009

TE-2009

B248p

Lykos 1825322

2009-09-09

Plano de Fábricas de
Lodo Praia em Minas de
Cálcio Industrial

2009-09-09

2009-09-09

2009-09-09

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005911

2009-09-09

2009-09-09

Planejamento de Lavra de Longo Prazo em Mina de Calcário Industrial

Leonardo Mendes Barlach

Email: leobarlach@gmail.com

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da utilização do conceito de ciclo de planejamento a uma mina pequena de calcário industrial localizada no estado de São Paulo.

Ele apresenta uma análise do mercado de calcário industrial e dolomito, assim como uma análise dos conceitos de planejamento de lavra e otimização de cava.

Por fim, ele contém plantas das diversas etapas do planejamento da mina e um detalhamento do processo de desenho da cava final.

Palavras chave: Calcário Industrial, Planejamento de Lavra, Desenho de Cava, Otimização de Cava, Ciclo de Planejamento

Abstract

This paper's objective is to present the results of the use of the concept of planning cycle to a small limestone mine in the state of São Paulo.

The paper presents an analysis of the market for industrial limestone and dolomite, as well as an analysis of the concepts of mine planning and pit optimization.

Finally, it contains the drawings of the several stages of the plan and details the process of designing the final pit.

Keywords: Industrial Limestone, Mine Planning, Pit Design, Pit Optimizing, Planning Cycle

Conteúdo

Resumo.....	2
Abstract	2
1. Prefácio.....	4
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Características do Calcário Industrial.....	4
2.2.1. Mineralogia.....	5
2.2.2. Geologia.....	5
2.2.3. Lavra.....	5
2.2.4. Processamento.....	5
2.2.5. Usos do Calcário.....	6
2.3. Planejamento de Lavra	6
2.3.1. Definição.....	6
2.3.2. Otimização de Cava.....	7
2.3.3. Horizontes de Planejamento.....	8
2.3.4. Conceito de Recurso e Reserva	9
3. Estudo de Caso.....	10
3.1. Introdução.....	10
3.2. Histórico	10
3.3. Resultados Obtidos	12
3.3.1. Remoção Anfiteatro – Cicatriz	12
3.3.2. Fase 1 – Produção sem Remoção do Britador	13
3.3.3. Fase Final: Cava Final Operacional.....	14
4. Análise do Planejamento Longo Prazo.....	15
4.1. Introdução.....	15
4.2. Etapas do Planejamento.....	15
4.3. Operacionalização da Cava	16
5. Conclusão e Considerações Finais.....	17
5.1. Recomendações Futuras.....	18
6. Bibliografia.....	18

1. Prefácio

O objetivo deste trabalho será um estudo de caso de planejamento de lavra para uma mina de calcário industrial no estado de São Paulo. A empresa dona da mina forneceu os dados ao LAPOL – Laboratório de Planejamento e Otimização de Lavra do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP e um trabalho foi realizado objetivando a realização de um plano estratégico de longo prazo (cava final) e um sequenciamento de curto prazo levando em conta fatores geológicos e geotécnicos, como pode ser visto no Histórico.

Desta forma, este documento será dividido em três partes. A primeira parte será uma revisão bibliográfica que tratará de uma análise do mercado de calcário industrial tanto no Brasil quanto no exterior, analisando também as aplicações deste material. Incluirá também uma descrição de padrões de planejamento de lavra utilizados mundialmente e uma breve análise de tecnologias novas neste campo.

A segunda parte contará com o planejamento de lavra feito pelo LAPOL e suas etapas. Estará incluído um histórico da empresa, discutindo as dificuldades que a levaram a realizar este planejamento estratégico, as diversas etapas do trabalho realizado, com foco maior no desenho de cava final que foi realizado pelo autor.

Por fim, a terceira parte terá uma análise do ciclo de planejamento longo prazo aplicado à empresa, com as dificuldades encontradas e uma análise dos resultados obtidos. O foco desta parte será na variação dos parâmetros de análise da cava quando se parte de uma otimização da cava para uma cava final operacional.

Este trabalho não poderia ser realizado sem o apoio da empresa que forneceu os dados, seus funcionários que foram extremamente prestativos e os membros do LAPOL que realizaram etapas anteriores do trabalho e apoiaram esta. E principalmente ao colega Freddy Chuá, que iniciou este trabalho no primeiro semestre de 2009 e, infelizmente, não pôde terminar.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Essa revisão bibliográfica será dividida em duas partes. A primeira irá tratar do mercado de calcário industrial, revisando desde características geológicas até aplicações de mercado.

A segunda parte tratará do conceito de planejamento de lavra e otimização de cava.

2.2. Características do Calcário Industrial

O calcário e o dolomito são rochas com grande aplicação em diversas áreas. Essas aplicações vão “desde os materiais de construção civil à produção de alimentos; da purificação do ar ao tratamento de esgotos; do refino do açúcar à pasta de dentes; da fabricação de vidros e aço à fabricação de papéis, plásticos, tintas, cerâmicas e tantos outros.” (Sampaio & Almeida, 2005)

Para essas aplicações, existem diversos tipos de rochas de carbonatos de cálcio e magnésio. Algumas dessas aplicações (como será mais bem mostrado adiante) permitem o uso indiscriminado de calcita e dolomita, assim

como rochas em outras proporções. No entanto, em certos casos as características químicas e físicas são altamente relevantes.

2.2.1. Mineralogia

As principais rochas carbonatadas são a calcita e a dolomita, mas existem outras, como mostrado na tabela a seguir:

Calcita	CaCO_3	$\text{CaO } 56\%$
Dolomita	$\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$	$\text{CaO } 30,4\% \text{ MgO } 21,95\%$
Aragonita	CaCO_3	$\text{CaO } 56\%$
Siderita	FeCO_3	
Ankerita	$\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4$	
Magnesita	MgCO_3	

Várias aplicações apresentam valores máximos de teores de CaO e MgO. Como esses minerais apresentam características mineralógicas semelhantes, é necessário o uso de análises químicas, difração de raios X e microscopia eletrônica para melhor identificá-los. Dentre os minerais, o que costuma apresentar maior valor econômico é a calcita.

2.2.2. Geologia

O cálcio é um dos elementos mais comuns da crosta terrestre, em torno de 3 a 4%. Quando constituindo o calcário, costuma ter origem em rochas ígneas, que sofrem erosão e corrosão, inclusive por ácidos. O cálcio é transportado em solução para o mar pela drenagem das águas. No Oceano, sofrem precipitação, devido à baixa solubilidade do carbonato de cálcio na água marinha. A evaporação e o aumento da temperatura também podem provocar essa precipitação.

Acredita-se que a formação de calcários magnesianos ou dolomíticos ocorra por substituição do cálcio no calcário puro por magnésio em águas com altos teores de sais deste elemento.

Várias são as impurezas presentes em calcários. Elas podem acontecer durante o processo de deposição do CaCO_3 ou depois. A impureza mais comum é a argila. Diversos argilominerais, em geral na forma de aluminiosilicatos, são encontrados nas rochas, podendo estar disseminados em toda a rocha ou em finos leitos no seu interior. Em geral, a presença desses minerais atrapalha a produção de cal. Além das argilas, outras contaminações silicosas podem ocorrer que normalmente afetam o aproveitamento econômico do calcário (calcário para fins metalúrgicos devem ter no máximo 2% de sílica). Compostos de ferro são prejudiciais ao uso do calcário na fabricação de tinta, papel, borracha e outros. Compostos com sódio ou potássio atrapalham aplicações que exigem calcário muito puro, e a presença de enxofre e fósforo são especialmente prejudiciais para a metalurgia.

2.2.3. Lavra

A maior parte das minas de calcário possui lavra a céu aberto, apesar de exceções existirem. Devido ao fato da rocha ser coesa e resistente, no entanto de baixa dureza e densidade, o método mais comum é o de perfuração e desmonte e transporte por caminhão. É comum, em grandes minerações, a terceirização das operações de lavra.

A remoção do solo de capeamento costuma ser considerado o aspecto mais importante da lavra de calcário, de modo que a relação estéril-minério deve ser controlada para manter a lavra economicamente viável. Devido ao baixo valor agregado do produto lavrado, é necessária uma maior escala de produção.

2.2.4. Processamento

O tratamento da rocha depende do uso final. Para muitos casos, utiliza-se somente a lavra seletiva, britagem e peneiramento como método de processamento.

Para fins mais nobres, podem-se utilizar métodos mais sofisticados. Se o produto exigido for de baixa granulometria, costuma-se utilizar a moagem com mínima contaminação de ferro, como os moinhos tipo Raymond e, em casos mais extremos, moinhos autógenos.

Para condições em que a pureza exigida é elevada, pode-se utilizar flotação ou a separação magnética, entre outros, para concentrar o calcário ou remover impurezas. Purificações químicas também podem ser utilizadas.

Entre os métodos químicos, está a formação do carbonato de cálcio precipitado (PCC), um produto sintético. O carbonato de cálcio sofre calcinação, formando cal (CaO) e dióxido de carbono. A cal reage com a água, formando a cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e reage com o dióxido de carbono, precipitando o carbonato de cálcio com alta pureza. Este método é mais utilizado na indústria de papel.

Outro produto de calcário é o carbonato de cálcio moído (GCC), que apresenta granulometria $< 10 \mu\text{m}$. Nesse caso, a principal preocupação é a de evitar a contaminação com ferro durante a moagem, que pode ser feito a seco ou a úmido.

Para a obtenção da cal, utiliza-se o aquecimento do calcário para temperaturas na faixa de 900 a 1000°C. A cinética de reação e a termodinâmica da calcinação são bens conhecidos, de modo que a maioria das pesquisas tem foco na eficiência dos fornos. Durante a calcinação, o material sofre perda de massa, referente à saída do CO_2 , que é conhecida como perda ao fogo (PF). Essa perda é de 44% para a calcita e 48% para a dolomita.

2.2.5. Usos do Calcário

Dentre os usos do calcário, dolomito e seus produtos, destacam-se:

- Indústria de cimento: responde por cerca de 70% da produção de calcário no país;
- Indústria de papel: utilizado como carga e cobertura;
- Indústria de plásticos: usado na produção de resinas e de PVC, proporciona dureza, propriedades de tensão e controla a viscosidade e a expansão térmica;
- Indústria de tintas: podem ser usados como carga e espalhador;
- Indústria de vidro: a dolomita e/ou aragonita são o terceiro principal insumo do vidro, junto com a areia de quartzo e a barriilha (Na_2CO_3) e atua como material fundente;
- Indústria cerâmica: a utilização tem como objetivo a redução da expansão por umidade;
- Agricultura: o calcário e seus produtos são utilizados como corretivo de solo, para aumentar o pH de solos ácidos;
- Alimentação de animais: utiliza-se de 1,1 a 1,2% de peso de CaCO_3 na alimentação de gado de corte e até 3% para frango de corte, exigindo-se baixos teores de sílica e restrições elevadas a arsênio e flúor;
- Rochas ornamentais ou decorativas: podem ser usados devido à variação de cores, inclusive calcário, dolomito e mármore;
- Indústria metalúrgica: o óxido de cálcio reage com impurezas, facilitando a metalurgia; na siderurgia, age como fundente e fluxante;
- Tratamento de águas: a cal hidratada pode reduzir a dureza da água (presença de sais de metais alcalinos e alcalinoterrosos e de metais).

Para cada uma dessas aplicações, existem especificações de produto.

2.3. Planejamento de Lavra

2.3.1. Definição

Uma definição comumente utilizada é que “o planejamento de lavra pode ser entendido como o processo de determinação do melhor plano de lavra de uma jazida, considerando as restrições físicas, geológicas, operacionais, ambientais, legais e econômicas, de modo a atender os objetivos da administração empresarial.” (Nico, 2004)

Segundo Senhorinho (2001), o processo de planejamento de lavra a céu aberto pode ser classificado em duas fases:

- Fase de planejamento técnico e análise de alternativas, incluindo pesquisa mineral, conceituação e projeto.
- Fase de avaliação e seleção da melhor alternativa

Desta forma, o planejamento de lavra pode ser ilustrado da seguinte maneira (tabela adaptada de Nico, 2004):

Table 1 Fases do Planejamento

Fase do Planejamento de Lavra	Ações a Serem Executadas
Planejamento técnico do esquema e análise das alternativas	Pesquisa: Obtenção de dados: morfologia, litologia, topografia, geotecnica, etc. Conceituação: Avaliação dos requisitos de qualidade, do sistema de transporte, dos custos operacionais, projeções de mercado e estimativa de preços. Projeto: Consolidação das informações obtidas nas etapas anteriores, obtenção dos limites econômicos da cava e cava final.
Avaliação e seleção da melhor alternativa	Avaliação e análise das opções obtidas na fase anterior e seleção do projeto e esquema a ser adotado

É importante notar que esse é um processo interativo. Uma otimização dos limites econômicos de lavra deve levar em conta fatores como custos de lavra, processo e variação de preços que são estimadas. Cada análise gera um fluxo de caixa, que precisa ser comparado com outras opções. Porém quando surgem novas informações (como informações geológicas mais precisas, ou novas rotas de beneficiamento), o ciclo de planejamento deve ser refeito, para se obter um novo resultado.

Como o planejamento de lavra envolve matérias-primas minerais, torna-se necessário levar em conta a incerteza geológica envolvida. Segundo De Tomi (2000), o planejamento deve ser executado sobre um modelo adequado da jazida.

Os produtos do planejamento de lavra, segundo Azevedo (2002), são, principalmente, tabelas de resultado, plantas topográficas e seções/perfis da cava.

2.3.2. Otimização de Cava

Senhorinho (2001) descreve os principais métodos de otimização disponíveis no mercado. Segundo o autor, as principais técnicas são:

2.3.2.1. Tentativa e Erro

Consiste em fazer um computador analisar todas as combinações possíveis de lavra a partir de um modelo de blocos, e informar aquele que traz o maior valor. O problema desse método é o número de cálculos necessários pode se tornar extremamente alto, mesmo para modelos de blocos relativamente pequenos.

2.3.2.2. Cones Flutuantes

Este método foi um dos primeiros métodos heurísticos a serem desenvolvidos. Ele parte de um modelo de blocos em que cada bloco de minério tem um valor positivo e cada bloco de estéril um valor negativo e consiste em cones invertidos que são posicionados em cada bloco de minério, e cujo valor é calculado. Se o valor do cone for positivo, todo o cone é lavrado.

O problema deste método é encontrar uma solução mútua entre cones sobrepostos. Isto é, ao calcular o valor de um cone, ele não leva em consideração que uma parte do estéril já teria tido seu valor considerado na lavra de outro

bloco de minério. Dessa forma, métodos de cones flutuantes muitas vezes falham em gerar limites de cava ótimos verdadeiros.

2.3.2.3. *Lerchs & Grossmann*

Este método baseia-se em técnicas de programação dinâmica e foi inicialmente desenvolvida para um sistema bidimensional, sendo mais tarde adaptado para um modelo tri-dimensional por T. Johnson e W. Sharp.

No método em 2D, partindo da esquerda para a direita, pra cada bloco será analisado entre os 3 blocos a sua direita (uma acima, um na mesma linha e um abaixo) qual é aquele de maior valor, e definir uma direção. O valor de cada bloco será substituído pela soma dele com aquele para onde a direção foi definida. Terminada a conta, a partir do topo e da direita, seleciona-se o bloco que ficou com maior valor e, seguindo as direções a partir dele, define-se o limite da cava ótima (um exemplo gráfico dos cálculos realizados pode ser encontrado em Senhorinho, 2001). Dois problemas são apresentados pelo autor para este método. O primeiro é que, para trabalhar com ângulos de cava diferentes de 45°, as dimensões dos blocos devem ser alteradas. O segundo é que, por ser 2D, ao fazer essa análise para cada seção, os resultados podem não se conectar adequadamente.

Um método chamado de 2 1/2 D faz essa análise em duas direções transversais (norte-sul e leste-oeste, por exemplo) e define a cava final como sendo uma forma de diamante que contém os dois limites obtidos. Não há, no entanto, garantia que essa cava é de fato ótima.

O método em 3D, matrizes são calculadas pra cada bloco, indicando o custo de lavra dele. Ao fim do cálculo, um bloco será lavrado se pertencer a um grupo contínuo de blocos que devem ser lavrados. Ele consiste em, a partir de cada bloco de minério, mover-se para cima, respeitando o ângulo de cava, e subtraindo do valor do bloco de minério o custo do bloco de estéril. Uma vez que um bloco de estéril teve seu custo subtraído, ele passa a não ser mais considerado no cálculo de outros blocos e contam-se os blocos de cima. Dessa forma, cada bloco de estéril estará ligado a um bloco de minério, que deverá “pagar” o seu custo de lavra. Se, ao final do cálculo, o bloco de minério ainda tiver um valor positivo, todos os blocos ligados a ele serão lavrados.

2.3.2.4. *Outros métodos*

Existem, hoje, outros métodos de otimização tanto de cava final quanto de seqüenciamento, que utilizam a maior capacidade de processamento dos computadores de hoje. A maioria dessas soluções é comercial, de modo a incorrer um custo no planejamento de lavra, de modo que são mais comumente utilizados em situações em que um planejamento ótimo é mais crítico para a viabilidade do projeto.

Um problema comumente apresentado dos métodos de otimização de seqüenciamento é que eles colocam cada cava como sendo uma expansão das anteriores em todas as direções, o que costumar não ser viável operacionalmente. Novos métodos incluem a possibilidade de manter a direção de avanço em para apenas algumas direções, de modo a maximizar outros fatores além do VPL. Uma análise desses outros métodos, no entanto, não é escopo deste trabalho.

2.3.3. *Horizontes de Planejamento*

Segundo De Tomi (2001), a maioria dos especialistas divide os horizontes de planejamento em “longo prazo” e “curto/médio” prazo. No planejamento de longo prazo, os horizontes normalmente são:

- Vida útil da mina (ou LOM, *life of mine*): estudo conceitual de aproveitamento da reserva até o fim da vida útil da mina.
- Planos Quinquenais: estudo de custos e receitas relativos aos próximos cinco anos.

No planejamento de curto/médio prazo, utilizam-se os seguintes:

- Planos anuais: referente à produção de um ano, com detalhamento de orçamentos de custos e despesas.
- Planos trimestrais: atualizações e ajustes do plano anual.

- Planos mensais: detalhamento para determinação de fatores operacionais.
- Plano operacional: acompanhamento do plano mensal.

A tabela a seguir, obtida de Owen apud De Tomi (2001), caracteriza esses horizontes:

Table 2 Horizontes de Planejamento

	Longo Prazo (Vida Útil)	Plano Quinquenal	Plano Anual
Foco	Conceitual	Capital	Custo Operacional
Precisão	Classe I (20%)	Classe II (10 – 15%)	Classe III (5%)
Escopo das Mudanças	Incluir / Eliminar / Adiar Projetos	Ajuste de Fases, Reposição de Frotas	Mudanças de Índices Operacionais
Receitas	Preços de Projeções de Longo Prazo	Previsões Quinquenais	Expectativas anuais e Políticas de “Hedging”
Frequência	Abril / Maio	Junho / Julho	Agosto / Setembro
Supporte Gerencial	Cenários Estratégicos	Planos de Produtividade, Melhorias de Processo	Performance x Objetivos, Compromisso Absoluto

2.3.4. Conceito de Recurso e Reserva

É importante em todas as fases do planejamento de lavra a diferenciação entre recurso e reserva, assim como os conceitos de reserva estimada e medida.

Recurso define-se como sendo a concentração ou ocorrência geológica em quantidade e qualidade suficiente para ser plausível a lavra. Esse conceito não leva em conta, no entanto, a viabilidade econômica ou técnica de se fazer essa lavra. Recursos podem ser inferidos, indicados ou medidos, dependendo basicamente da confiabilidade da amostragem e da distância entre a posição do recurso e a sondagem.

Segundo Steinberg & De Tomi (2009), padrões da indústria, como o US-SEC (2005), possuem uma definição de reserva, dividido entre indicada e medida. Reservas minerais são definidas como sendo porções do corpo de minério que podem legalmente e economicamente ser lavradas no momento da definição.

O JORC (2004), padrão da indústria mineira australiana, divide reservas em prováveis e provadas, porém com definições semelhantes.

Reservas estimadas seriam aquelas definidas através de amostragem e um plano de aproveitamento econômico. O nível de certeza, diferentemente das reservas medidas, seria menor, tanto devido à distância da amostragem quanto a qualidade da análise econômica.

Já reservas medidas são definidas como sendo aquelas geradas pela melhor estimativa possível da quantidade e qualidade da reserva, assim como de viabilidade técnica e econômica. Segundo Pereira abud Steinberg & De Tomi (2009), o erro de estimativa das reservas medidas deve ser de no máximo 20%, enquanto que para reservas estimadas, esse valor pode chegar a 40%.

3. Estudo de Caso

3.1. Introdução

Como já apresentado nos capítulos anteriores, o objetivo deste trabalho é apresentar o resultado da aplicação parcial do ciclo de planejamento de lavra para uma mina de calcário industrial no estado de São Paulo.

A primeira parte contará com uma apresentação das características da mina e um histórico dos problemas. A segunda parte apresentará os desenhos de cava para três diferentes fases de lavra.

3.2. Histórico

A mina em questão produz calcário para fins industriais, em especial para a indústria de tintas. Para tal, faz uma lavra seletiva de calcário de diferentes cores na sua mina.



Figure 1 Foto da Cava

A mina existe há mais de 70 anos e não faz parte de nenhum grande grupo, sendo que a empresa possui somente essa mina e outra no sul do país. A mina estudada possui duas cavas, sendo que apenas a maior, a oeste, foi estudada. Uma topografia desta cava pode ser vista a seguir:

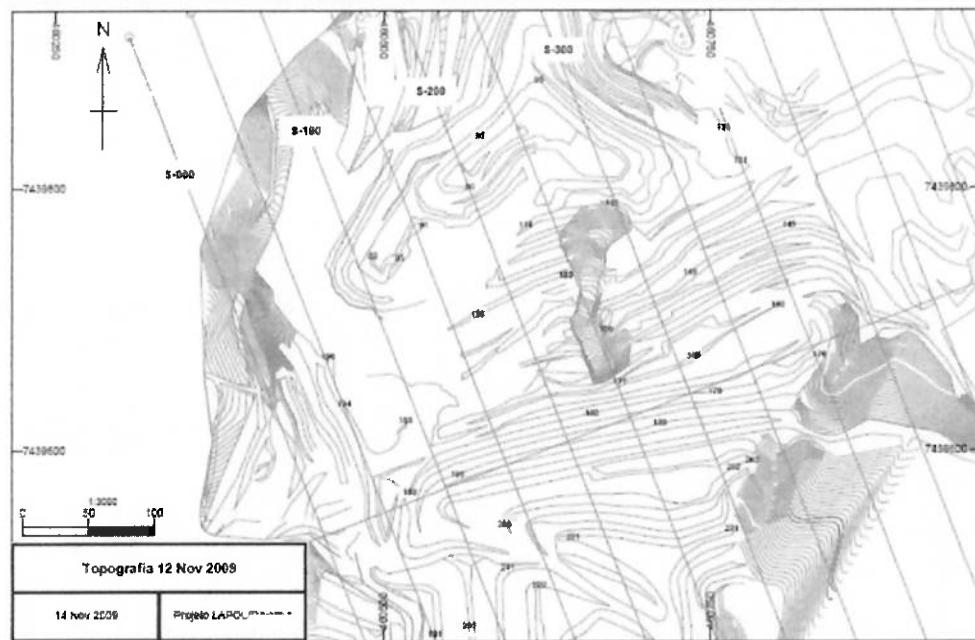


Figure 2 Topografia Novembro 2009

A mina possui dois bota-foras, um no topo da cava ao norte, que tem atrapalhado o avanço. O segundo está a nordeste da cava. Toda a produção é movida por caminhão para um britador que fica a sudoeste da cava.



Figure 3 Posição do Britador Sobre a Face Oeste da Cava

Recentemente, a mina tem sofrido com duas dificuldades principais. A primeira diz respeito ao fato de que há pouca reserva liberada atualmente, exigindo uma grande e custosa remoção de estéril. A segunda é uma dificuldade de natureza geotécnica, já que recentemente descobriu-se uma falha no estéril na face norte, que tem levado a um escorregamento.



Figure 4 Foto dos Escorregamentos de Solo

Com essas dificuldades, e a necessidade de aumentar a produção, a empresa tem trabalhado com o LAPOL para desenvolvimento de um planejamento de lavra com os seguintes objetivos:

- Remoção do estéril sobre a falha (chamado anfiteatro e cicatriz) para acabar com o risco de mais escorregamentos;
- Definição de um plano de longo prazo para uma cava final em duas etapas, a primeira sem remover o britador e a segunda removendo o britador, para aproveitar a reserva abaixo dele, levando em conta a relação estéril-minério que torne o plano viável;
- Sequenciamento de produção levando em conta os planos acima e uma relação estéril-minério adequada.

No momento que este documento é escrito, as duas primeiras partes já estavam finalizadas, e a terceira em fase final.

3.3. Resultados Obtidos

Para os valores de produção, a pedido da empresa que forneceu os dados, os valores reais serão omitidos. Em todos os casos, a produção de calcário na fase da remoção do anfiteatro – cicatriz será considerada de 1 m³, e será mantida a proporção.

3.3.1. Remoção Anfiteatro – Cicatriz

A remoção do anfiteatro – cicatriz é o nome dado, dentro do projeto, a fase do trabalho que constituía da remoção do estéril sobre a falha, de modo a impedir novos escorregamentos. A figura a seguir mostra o resultado final desta etapa:

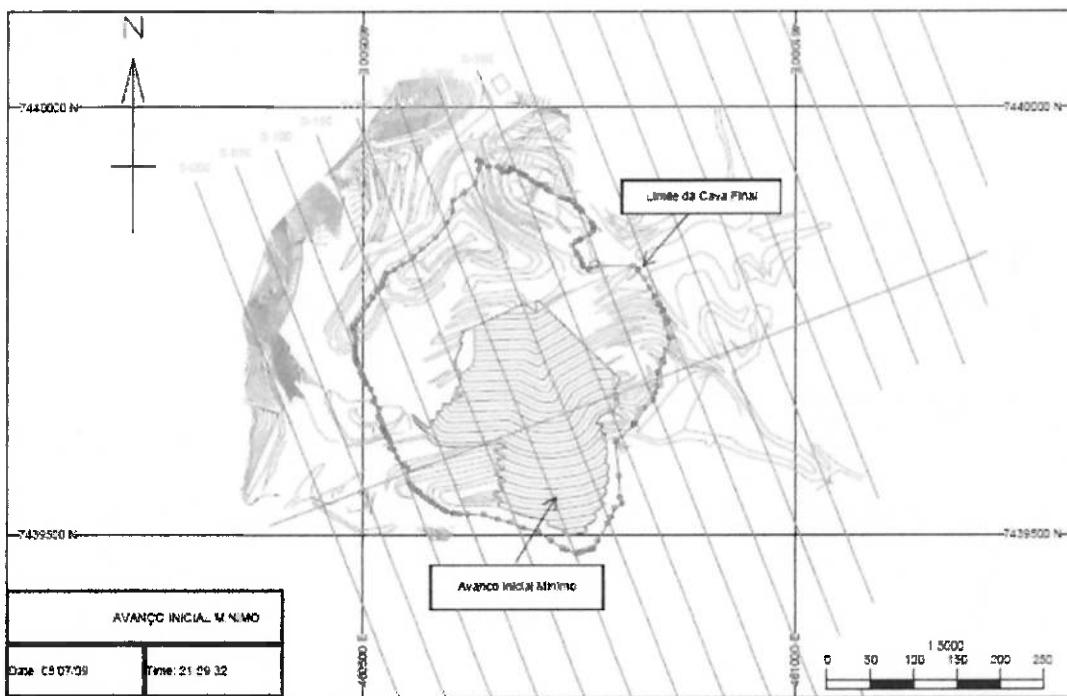


Figure 5 Avanço Anfiteatro - Cicatriz

Nesta fase, as quantidades removidas foram:

- Litologia:
 - Estéril: $1,990 \text{ m}^3$
 - Minério: $1,000 \text{ m}^3$
- REM = 1,990

3.3.2. Fase 1 – Produção sem Remoção do Britador

O objetivo desta fase foi, a partir do desenho de cava final, definir um *pushback* inicial que permitisse produção por pelo menos dois anos sem a remoção do britador principal, que fica a sudoeste da cava. O desenho desenvolvido pode ser visto a seguir:

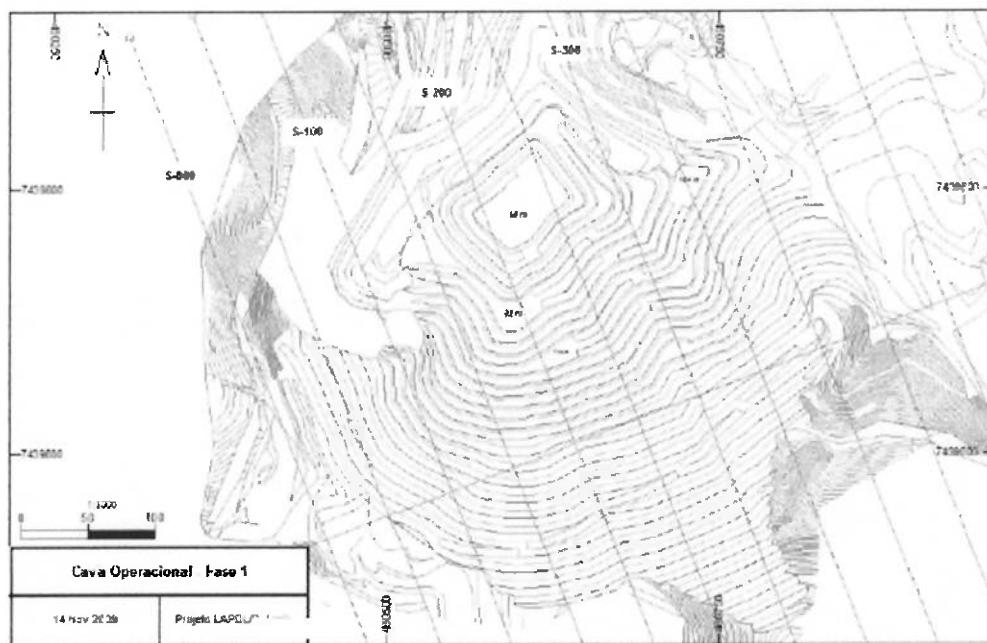


Figure 6 Projeto Fase 1

Nesta fase, as quantidades removidas foram:

- Litologia:
 - Estéril: 4,889 m³
 - Minério: 5,303 m³
- REM = 0,922
- Horizonte de Produção: 4 anos

3.3.3. Fase Final: Cava Final Operacional

Para esta fase, foi feita a otimização da cava utilizando software adequado, para atingir uma cava final otimizada. Esta cava final foi alterada para se adequar a parâmetros geotécnicos e depois operacionalizada (este processo está descrito no capítulo a seguir). O resultado obtido pode ser visto na figura a seguir:

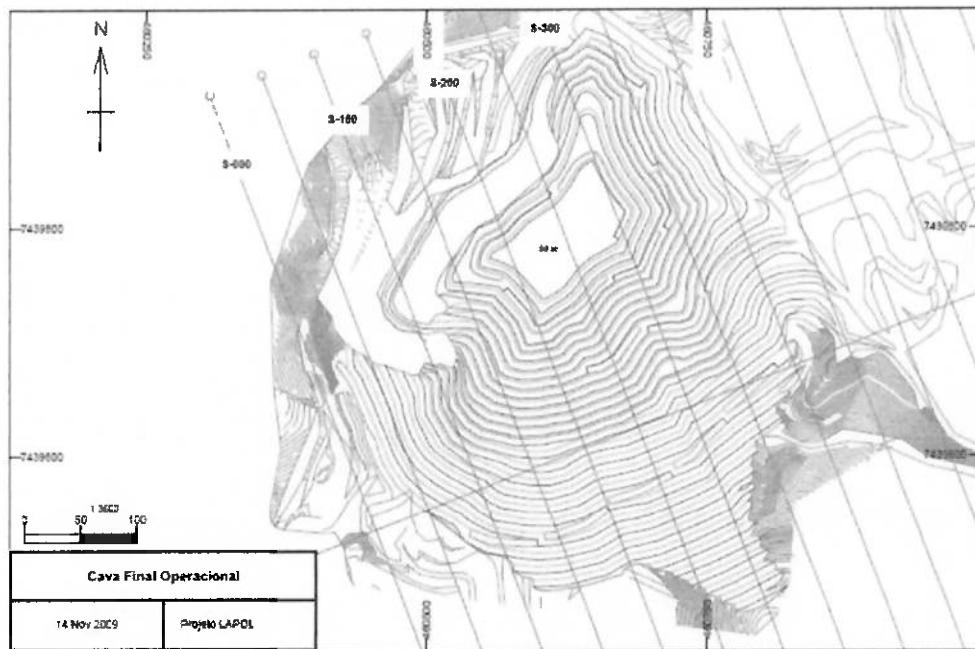


Figure 7 Cava Final Operacional

Nesta fase, as quantidades removidas foram:

- Litologia:
 - Estéril: $6,048 \text{ m}^3$
 - Minério: $6,835 \text{ m}^3$
- REM = 0,885
- Horizonte de produção: 10 anos

4. Análise do Planejamento Longo Prazo

4.1. Introdução

Esta parte do trabalho irá analisar as etapas do planejamento de longo prazo, isto é, o desenho da cava final, utilizado neste projeto.

A primeira parte irá mostrar os diferentes valores de reserva e REM nas diversas etapas do trabalho, partindo da cava não operacional ótima até a cava operacional.

A segunda parte irá tratar da operacionalização da cava final, incluindo os parâmetros de desenho usados e a metodologia.

4.2. Etapas do Planejamento

O planejamento partiu de um modelo litológico baseado em furos de sonda feitos nas diversas seções da mina. Destes furos, quatro litologias foram identificadas:

- Solo Natural (considerado estéril)
- Solo Não-consolidado (considerado estéril)

- Calcário Superior (considerado minério)
- Calcário Inferior (considerado minério)
- Gnaisse (considerado estéril)
- Xisto (considerado estéril)

A intersecção do modelo litológico com a topografia pode ser visto na figura a seguir:

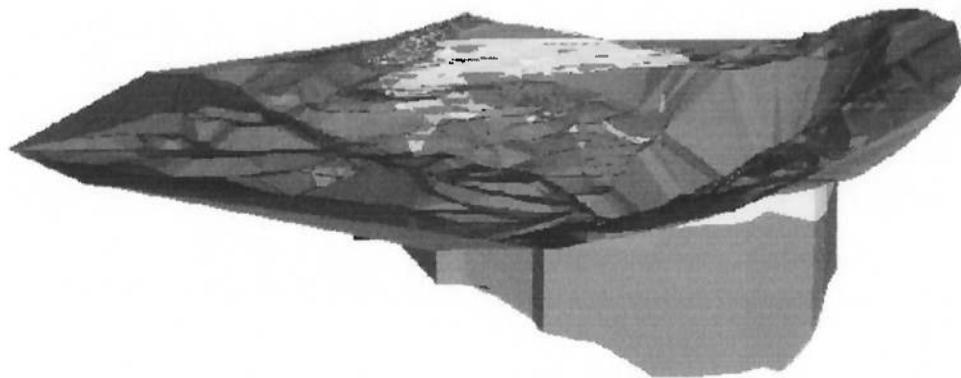


Figure 8 Intersecção do Modelo Litológico com a Topografia

É importante notar que, devido à falta de informações de sondagens, o modelo litológico não possui informações para todas as regiões da cava. Nos casos em que a cava foi desenhada fora do modelo, todo o volume foi considerado estéril, a favor do conservadorismo. No entanto, sabe-se, a partir de informações de campo, que as regiões tanto a leste quanto a oeste da mina possuem corpos de calcário que seriam considerados minério se houvesse informações suficientes. Dessa forma, pode-se dizer que os valores calculados subestimam a quantidade de minério e superestimam a relação estéril-minério em relação à realidade.

O desenho da cava não-operacional foi feito a partir de cones tentando maximizar a recuperação e reduzir a REM. A partir de novas informações geotécnicas de ângulo de talude, a cava não-operacional foi refeita. Ambas estas fases foram feitas pela mestrande do LAPOL Engenheira Tatiane Marin. Uma cava operacional foi feita a partir desta, obtendo os resultados finais, que podem ser vistos na tabela a seguir (valores proporcionais, considerando a produção da fase 0 como 1 m³):

Table 3 Valores Obtidos

Cava	Tipo de Reserva	Quantidade de Minério	REM
Cava Não-Operacional Revisada	Reserva Indicada – Revisada	9,135	0,591
Cava Operacional	Reserva Medida	6,835	0,885

4.3. Operacionalização da Cava

A operacionalização da cava final foi feita utilizando o software Datamine a partir da cava não-operacional obtida na etapa anterior.

Os parâmetros técnicos considerados foram os seguintes:

- Bancos entre as cotas 50 e 86:
 - Altura do Banco: 12 m
 - Largura da Berma: 5 m
 - Ângulo de Talude: 75°
 - Gradiente das Rampas: 10%
- Bancos acima da cota 86:
 - Altura do Banco: 6 m
 - Largura da Berma: 6 m
 - Ângulo de Talude:
 - Calcário: 70°
 - Gnaissse: 70°
 - Solo: 45°
- Gradiente das Rampas: 10%
- Raio de Curvatura: 25 m

Os acessos à mina se dariam da seguinte forma:

- Para os níveis inferiores, o acesso se daria a partir de uma rampa no lado sudoeste e depois rampas em cava;
- Para os níveis intermediários, continuar-se-ia utilizando os acessos atuais, pelo lado oeste da cava;
- Para os níveis superiores, o acesso se daria por uma única rampa em cava, de modo a minimizar o efeito na relação estéril-minério.

Os limites foram considerados de modo a minimizar a remoção de estéril do bota fora que se encontra no topo da face norte da mina.

5. Conclusão e Considerações Finais

A aplicação do ciclo de planejamento para uma pequena mina de calcário é importante para mostrar a eficácia desse tipo de técnica mesmo em operações desse tipo. O uso adequado de técnicas de planejamento de lavra já é comum em grandes empresas de minérios de alto valor, como metálicos. Porém, a indústria de mineração de calcário costuma considerar o valor do material muito baixo para se investir nisso, o que muitas vezes acaba por prejudicar seriamente o retorno do empreendimento.

No entanto, casos como o apresentado mostram que técnicas modernas de otimização e desenho de cava podem e devem sim ser aplicadas em minerações pequenas com produtos de baixo valor agregado. Especialmente se for considerado que o correto planejamento da remoção de estéril da mina pode reduzir custos significativamente. O exemplo apresentado neste trabalho mostra como essas técnicas podem transformar uma mina que teve produção pequena por dois anos seguidos em uma mina com potencial para produção por mais 10 anos. Isso é importante não somente no aspecto econômico, mas também no aspecto da responsabilidade por se tratar de recursos naturais finitos que devem ser extraídos com a maior eficácia possível.

Porém, tão importante quanto a realização destes planos é a sua correta execução. Em muitas empresas, é comum que a cultura seja de confiar mais em análises empíricas da lavra do que em planos. Felizmente, a mineração estudada também é um exemplo de empresa que adere fielmente a planos adequados de lavra, buscando sempre a sustentabilidade do negócio, sustentabilidade tal que não seria conseguida sem a utilização de padrões adequados de planejamento de lavra.

5.1. Recomendações Futuras

A principal recomendação futura para este trabalho é a de concluir o ciclo de planejamento fazendo o sequenciamento de curto prazo da lavra e a análise anual de aderência e ajuste do planejamento de longo prazo.

Na área acadêmica, uma sequência importante para este trabalho seria detalhar melhor as técnicas mais modernas de otimização de cava.

6. Bibliografia

- AZEVEDO, R. C. (2002). *Aplicação de Realidade Virtual no Planejamento de Lavra (Tese de Mestrado)*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- CHAUSSON, D. S. (2004). *Sequenciamento Otimizado de Cava por Blendagem para Jazidas de Calcário (Tese de Mestrado)*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- DE TOMI, G. F. (2001). *Controle de Qualidade em Minas de Calcário para Cimento (Dissertação de Livre Docência)*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- FARIAS, S. L. (2003). *Controle de Qualidade na Lavra em Minas de Calcário para Cimento (Tese de Mestrado)*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- GONDO, P. K. (2004). *Ciclo de Planejamento de Lavra para Mina de Calcário para Agragados (Trabalho de Formatura)*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- NICO, O. M. (2004). *Aplicação de Software de Mineração no Planejamento de Lavra de Pedreiras de Agregados para a Construção Civil*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- SAMPAIO, J. A., & ALMEIDA, S. L. (2005). Calcário e Dolomito. In: A. B. LUZ, & F. F. LINS, *Rochas & Minerais Industriais* (pp. 327-350). Rio de Janeiro: CETEM-MCT.
- SENHORINHO, N. C. (2001). *Otimização de Cava em Minas de Calcário para Cimento (Tese de Mestrado)*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP.
- SMUTNÝ, L., FARANA, R., KEBO, V., & STRAKOS, V. (2002). *Mine Planning and Equipment Selection '02*. Ostrava - República Checa: Technical University of Ostrava.
- STEINBERG, J. G., & DE TOMI, G. F. (2009). Lean mining: principles for modelling and improving processes of mineral value chains. *Int. J. Logistics Systems and Management*, Vol. 5 (No. 6), 4.
- The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC). (2004). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves - The JORC Code*.